



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Ingrīda Lavrinoviča

JAUNĀS PAAUDZES AR RETZEMJU ELEMENTIEM LEĢĒTO OPTISKO ŠĶIEDRU PASTIPRINĀTĀJU IZSTRĀDE UN NOVĒRTĒJUMS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Ingrīda Lavrinoviča

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorante

**JAUNĀS PAAUDZES AR RETZEMJU
ELEMENTIEM LEGĒTO OPTISKO ŠĶIEDRU
PASTIPRINĀTĀJU IZSTRĀDE UN
NOVĒRTĒJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
JURĢIS PORIŅŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Lavrinoviča, I. Jaunās paaudzes ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju izstrāde un novērtējums. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 28 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes “RTU P-08” 2019. gada 4. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 44.

ISBN 978-9934-22-303-7 (print)
978-9934-22-304-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 27. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ģirts Ivanovs,
Rīgas Tehniskā universitāte, Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Vadošais pētnieks *Dr. phys.* Jānis Alnis,
Latvijas Universitāte, Atomfizikas un spektroskopijas institūts, Latvija

Profesors *Dr. phys.* Valfrīds Paškevičs,
Daugavpils Universitāte, Dabaszinātņu un matemātikas fakultāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ingrīda Lavrinoviča (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 54 attēli, astoņas tabulas, četri pielikumi, kopā 103 lappuses. Literatūras sarakstā ir 110 nosaukumu.

SATURA RĀDĪTĀJS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	5
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	6
Tēmas aktualitāte.....	6
Darba mērķis un uzdevumi	7
Pētījumu metodika.....	8
Promocijas darba galvenie rezultāti	8
Darba praktiskā vērtība	9
Darbā izvirzītās aizstāvamās tēzes	10
Rezultātu aprobācija	10
Darba apjoms un struktūra	13
DARBA NODAĻU IZKLĀSTS	14
Pirmā nodaļa.....	14
Otrā nodaļa	14
Trešā nodaļa	19
Ceturtnā nodaļa	21
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	25
LITERATŪRA.....	27

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

ASE – Amplified Spontaneous Emission – pastiprinātā spontāna emisija

E

EDF – Erbium Doped Fiber – ar erbiju leģēta šķiedra

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – ar erbiju leģētas optiskās šķiedras pastiprinātājs

EYCDFA – Erbium-Ytterbium co-doped Fiber Amplifier – ar erbija un iterbija joniem leģētas šķiedras pastiprinātājs

EYDFA – Erbium-Ytterbium-Doped-Fiber Amplifier – ar erbiju un iterbiju leģētas šķiedras pastiprinātājs

F

FOPA – Fiber Optical Parametric Amplifier – parametriskais šķiedru optiskais pastiprinātājs

H

HDWDM – High Density Wavelength Division Multiplexing – augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšana

I

ITU-T – International Telecommunication Union – Starptautiskā telekomunikāciju apvienība

L

LOA – Linear Optical Amplifier – lineārais optiskais pastiprinātājs

M

MOPA – Master Oscillator Power Amplifier – oscilatora jaudas pastiprinātājs

N

NRZ-OOK – Non-Return to Zero On/Off Keying – ieslēgts/izslēgts manipulācija ar bez atgriešanās uz nulli kodēšanu

R

REDFA – Rare-Earth-Doped Fiber Amplifier – ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātājs

S

SDM – Space-Division Multiplexing – telpdales blīvēšana

SM-SCF – Single-mode Singlecore fiber – vienmodas vienkodola optiskā šķiedra

SNR – Signal-to-Noise-Ratio – signāla un trokšņa attiecība

SOA – Semiconductor Optical Amplifier – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

SSMF – Standard Single-mode Fiber – standarta vienmodas optiskā šķiedra

T

TDM – Time-Division Multiplexing – laukdales blīvēšana

W

WDM – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana

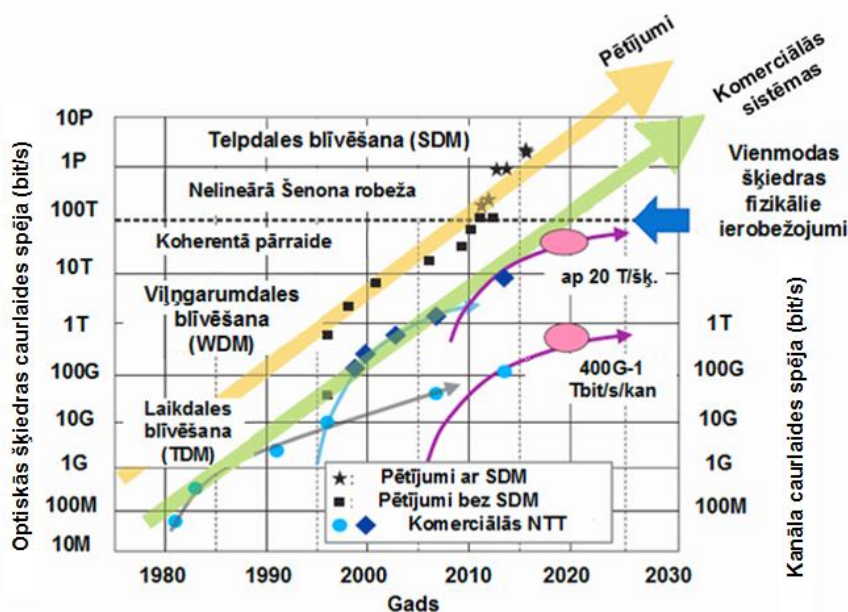
Y

YDF – Ytterbium Doped Fiber – ar iterbiju leģēta šķiedra

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Mūsdienās telekomunikāciju nozare strauji attīstās. Šķiedru optikas pārraides sistēmas ir integrējušās dažāda mēroga datu pārraides tīklos: korporatīvie, piekļuves un reģionālie tīkli, pilsētu un starppilsētu līnijas, transkontinentālie tīkli. Kā redzams 1. attēlā, pēdējo četrus gadus desmitus laikā datu pārraides ātrums optiskajās sakaru sistēmās ir palielinājies no 100 Mbit/s standarta vienmodas optiskajā šķiedrā 70. gados līdz virs 24 Tbit/s mūsdienu komerciālās sistēmās [14].



1. att. Šķiedru optikas pārraides sistēmu attīstības tendences [10].

Datu pārraidei lielos attālumos ar vājinājuma koeficientu, kas ir mazāks par 0,2 dB/km, šķiedru optikā pārsvarā tiek izmantota C frekvenču josla (1530–1550 nm) un L frekvenču josla (1565–1625 nm), kurās optisko pastiprinātāju caurlaides josla ietilpst 40 nm (5 THz). Savukārt ap 2020. gadu ir paredzams, ka kopējo optisko pastiprinātāju caurlaides joslu būtu nepieciešams paplašināt līdz 120 nm (15 THz), attiecīgi pārklājot arī S frekvenču joslas diapazonu (1460–1530 nm). Ņemot vērā minēto, kopējā pārraides sistēmas caurlaides spēja tiecas sasniegt ap 150 Tbit/s [11], [12].

Vadoties pēc avota [13] datiem, jau ir palaistas un darbojas pārraides sistēmas ar ātrumu virs 100 Tbit/s, izmantojot vienmodas vienkodola optiskās šķiedras *SM-SCF* (*Single-Mode Singlecore Fiber*) un apvienojot līdz 100 augstā blīvuma (*HDWDM*) kanālus ar laikdales *TDM* (*Time-Division Multiplexing*) un telpdales *SDM* (*Space-Division Multiplexing*) blīvēšanu.

Pieaugot pa vienu kanālu pārraidāmo datu apjomam, ir nepieciešamība pēc lielākajām optiskajām jaudām, tāpēc daudzkanālu sakaru sistēmas optimizācijas gaitā ir jāskatās ar divām pamatproblēmām – caurlaides joslas un ieejas jaudas palielināšanās [1].

No signālu pārvades teorijas ir zināms, ka caurlaides josla attiecībā pret fiksēto signāls-troksnis parametru (*SNR*) tiek definēta ar maksimālo Šenona robežu η_{maks} [9]:

$$\eta_{\text{maks}} = \log_2 \left(1 + \frac{RE_b}{N_0W} \right), \text{ (bit/s)/Hz,} \quad (1.)$$

kur E_b – enerģijas daudzums viena bita pārraidei,

R – sistēmas pārraides ātrums, bit/s,

N_0 – trokšņa jaudas spektrālais blīvums,

W – kanāla caurlaides spēja, Hz.

Pieaugot optiskā signāla jaudai, palielinās arī starpkanālu šķērstrokšņi, ko izraisa impulsa kropļojumi nelineāro efektu ietekmē [4], [7], [16]. Vadoties pēc nelineārā Šenona robežas parametra, šobrīd pārraides sistēmas spektrālās efektivitātes palielināšanas potenciāls tiek ierobežots apmēram četras reizes, pieņemot, ka esošajās sistēmās tiek pārraidīti 2 biti uz simbolu [2]. Respektīvi, ir jāpaplašina spektrālā josla, virzoties uz L frekvenču diapazonu.

Optiskās jaudas zudumus izraisa vājinājums optiskajās šķiedrās, kas rodas izkliedes un absorbcijas procesu rezultātā, un tā ir aktuāla problēma, pārraidot optisko signālu lielos attālumos. Standarta vienmodas optiskajā šķiedrā *SSMF* (*Standard Single-Mode Fiber*) pie viļņa garuma 1550 nm vājinājums ir ap 0,2 dB/km. Palielinoties optiskās sakaru līnijas garumam, ik pēc 50–100 km signāls tiek novājināts par 10–20 dB, un tas ir jāatjauno [18]. Respektīvi, ir jānodrošina jaudas rezerves, jo bitu plūsmas uzturēšanai raidītājam ir jāpadod jaudīgāks signāls, atbilstoši – tas ir jāpastiprina.

Šādam nolūkam tiek izmantoti optiskie pastiprinātāji, jo atšķirībā no reģeneratoriem mūsdienu komerciālajās šķiedru optikas pārraides sistēmās tie nodrošina optiskā signāla pastiprināšanu bez optiski elektriskās pārveidošanas. Optiskie pastiprinātāji ir pielāgojami datu pārraides ātrumam un modulācijas formātam, kā arī var vienlaikus pastiprināt vairākus optiskos signālus uzdotajā frekvenču diapazonā.

No visa iepriekš minētā var secināt, ka telekomunikāciju nozares straujā attīstība un pārraidāmo datu apjoma pieaugums nosaka vienu no stratēģiskajiem virzieniem, kas vērsts uz optiskā tīklā resursu izmantošanas optimizāciju un efektivitātes paaugstināšanu. Šāds virziens ir jaunā tipa optisko pastiprinātāju izstrāde, kas nodrošinātu lielākas izejas jaudas, kā arī paplašinātu pastiprināšanas viļņu garumu diapazonu [8], [11], [17].

Darba mērķis un uzdevumi

Apkopojot iepriekš minētos faktus, tika izvirzīts **promocijas darba mērķis**: novērtēt ar retzemju elementiem legētu telekomunikāciju optisko šķiedru parametrus, kā arī izstrādāt risinājumu optiskā signāla pastiprināšanas diapazona paplašināšanai viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas S (1460–1530 nm) un L (1565–1625 nm) joslās.

Definētā mērķa sasniegšanai bija jāveic vairāki **pamatuzdevumi**

1. Izpētīt optiskajās sakaru sistēmās izmantojamās ar retzemju elementiem legētas optiskās šķiedras, to īpašības un pielietošanas iespējas optiskajos pastiprinātājos.

2. Izstrādāt daudzkanālu sakaru sistēmas modeli datorsimulācijas programmā ar datu pārraides ātrumu līdz 40 Gbit/s ar retzemju elementiem legētu optisko šķiedru pastiprinātāju novērtēšanai.
3. Ar datorsimulācijas programmu novērtēt pastiprināšanas efektivitāti un trokšņa faktoru atkarībā no legētās šķiedras garuma un jaudas ar erbiju legētajām optiskajām šķiedrām.
4. Ar datorsimulācijas programmu novērtēt ar iterbiju legētu optisko šķiedru pastiprināšanas efektivitāti un trokšņa faktoru atkarībā no legētās šķiedras garuma un jaudas.
5. Izmantojot iegūtos simulāciju rezultātus, eksperimentāli novērtēt pastiprinājuma koeficientu, trokšņa faktoru un pastiprinātās spontānās emisijas parametru dažāda garuma ar erbiju un iterbiju legētām optiskajām šķiedrām.
6. Ar divu šķiedru šķērsnobīdes metodi nomērīt efektīvo laukumu ar erbiju un iterbiju legētām optiskajām šķiedrām, lai novērtētu nelineāro optisko efektu izpausmi ar retzemju elementiem legētās šķiedrās.
7. Pamatojoties uz iepriekš veikto analīzi un iegūtajiem rezultātiem, izpētīt ar retzemju elementiem legētu optisko šķiedru kombinēto pastiprinātāju parametrus optiskā signāla pastiprināšanas diapazona paplašināšanai viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas S (1460–1530 nm) un L (1565–1625 nm) joslās un salīdzināt iegūtos rezultātus.

Pētījumu metodika

Promocijas darba izvirzīto uzdevumu realizācija un problēmu analīze tika veikta ar skaitliskām simulācijām un eksperimentāliem mērījumiem. Skaitliskajās simulācijās, izmantojot uz nelineārā Šrēdingera vienādojuma balstītu aprēķinu algoritmu, ir novērtēti ar erbiju un iterbiju legētu optisko šķiedru parametri: pastiprinājums un trokšņa faktors. Efektīvā laukuma eksperimentālie mērījumi ar erbija un iterbija legētām šķiedrām ir veikti, izmantojot šķērsnobīdes metodi ar mikropozicionieri. Mērījumu gaitā tiek iegūts tālā lauka sadalījums, kas ar Henkeļa transformāciju tiek pārrēķināts uz tuvā lauka sadalījumu. Ar *MATLAB* programmatūru no iegūtā tuvā laukā sadalījuma ir aprēķināts šķiedras efektīvais laukums A_{eff} .

Kombinētā ar erbija un iterbija legētās šķiedras pastiprinātāja praktiskā realizācija veikta, izmantojot nepārtrauktā starojuma lāzera pamatstarojumu; ierosinošo avotu, kas nokonfigurēts darbībai tiešajā un pretējā virzienā, kā arī saslēdzot kopā noteiktā garuma ar Er^{3+} un Yb^{3+} joniem legēto šķiedru posmus. Pastiprinājuma spektra novērtēšanai ir izmantots spektra analizators.

Promocijas darba galvenie rezultāti

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Izstrādāta un aprobēta šķērsnobīdes metode ar retzemju elementiem legētu optisko šķiedru efektīvā laukuma novērtēšanai.
2. Eksperimentāli, apvienojot ar erbiju un iterbiju legētas šķiedras segmentus, ir iegūts pastiprinājums viļņa garumu diapazonā 1000–1100 nm, kas dod iespēju paplašināt erbija pastiprinājuma joslu no 47 nm līdz 82 nm.

Promocijas darba izstrādes gaitā iegūtie galvenie secinājumi

1. Veicot *EDFA* pastiprinātāja datormodelēšanu, noteikts, ka pretējā virzienā pie 1480 nm ar 30 m erbija šķiedru un 500 mW ierosinošā avota jaudu ir iespējams iegūt 40,7 dB pastiprinājuma koeficientu, kas ir par 12 dB vairāk nekā ar analogisku šķiedras garumu tiešajā virzienā.
2. Praktiski konstatēts, ka ar 15 m garo *HWT* erbija šķiedru un divvirzienu *EDFA* pumpēšanu iespējams nodrošināt 14,4 dB pastiprinājumu ar minimālo ierosinošā avota jaudu 21,3 mW. Salīdzinot ar vienvirziena pumpēšanu, ierosināšanai ir nepieciešams par 16 mW mazāk jaudas.
3. Ar eksperimentālo šķērsnobīdes metodi noteikts, ka efektīvā laukuma vērtības erbija šķiedrai pie 1310 nm atbilst $36,5 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm – pieaug līdz $57,1 \mu\text{m}^2$. Iterbija šķiedras gadījumā A_{eff} parametrs ir lielāks: pie 1310 nm A_{eff} ir $106,2 \mu\text{m}^2$ un pie 1550 nm – $129,2 \mu\text{m}^2$. Respektīvi, kombinēto optisko pastiprinātāju izstrādē ir lietderīgāk izmantot ar iterbiju leģētās šķiedras.
4. Kombinētajā ar erbija un iterbija joniem leģētās šķiedras jaudas pastiprinātājā (*EYCDFA*) ir efektīvi izmantot īsākās iterbija šķiedras, jo ar 10 m *YDF* tiek iegūta stabila 36 dBm (5W) izejas jauda.
5. Ar kombinēto erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāju (*EYDFA*), izmantojot pumpēšanu pretējā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, ar ierosinošā avota jaudu 13,3 dBm ir iegūts maksimālais pastiprinājuma koeficients 8,4; 15,2 dBm jaudai atbilst 5 dB pastiprinājuma koeficients. Tādējādi ar pretējo *EYDFA* konfigurāciju tiek nodrošināts jaudas ietaupījums par 2 dBm.
6. Eksperimentāli ir iegūta paplašinātā spektrālā josla 1000–1100 nm robežās, kas var tikt izmantota kā ierosinošā avota pumpēšanas viļņa garums turpmākajā *EYDFA* izpētē.

Darba praktiskā vērtība

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti divu Latvijas zinātniskās pētniecības projektu realizācijai.
2. Izstrādāts, iesniegts un publicēts patents par ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru efektīvā laukuma mērījumiem ar šķērsnobīdes metodi (patenta pieteikuma numurs P-16-103, publikācijas datums 20.06.2018).
3. Izstrādāts un iesniegts komercializācijas pieteikums “Optisko šķiedru efektīvā laukuma mērīšana ar šķērsnobīdes metodi”.
4. Kombinētā ar erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (*EYDFA*) izpētes rezultātā ar iterbija šķiedru ir iegūta aktīvā ierosināšanās pie mazajām ierosinošā avota jaudām, kas ietilpst 13–15 dBm robežās.
5. Iegūts eksperimentāls apliecinājums tam, ka, apvienojot ar erbiju un iterbiju leģētu optisko šķiedru segmentus, ir iespējams paplašināt pastiprinājuma viļņa garumu diapazonu 1000–1100 nm joslā.

Darbā izvirzītās aizstāvamās tēzes

1. *EDFA* un kombinētā *EYCDFA* pastiprinātāju kaskādes slēguma izmantošana oscilatora jaudas pastiprinātāja konfigurācijā var realizēt jaudīgu gaismas avotu ar izejas jaudu līdz 35,6 dBm.
2. Ar iterbiju leģētām optiskajām šķiedrām ir nepieciešams lielāks efektīvais laukums A_{eff} nekā ar erbiju leģētām optiskajām šķiedrām, lai iegūtu lielāku optisko pastiprinājumu.
3. Izmantojot 5 m garu erbija šķiedru un 5 m garu iterbija šķiedru kombinētajā *EYDFA* pastiprinātājā, ar ierosināšanu pretējā virzienā pie jaudas līmeņa 13,4 dBm iespējams eksperimentāli iegūt 8,4 dB lielo pastiprinājumu ar 2,5 dB trokšņa faktoru.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti 11 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti vienā publikācijā zinātniskajā žurnālā, vienā Latvijas patenta pieteikumā, astoņos rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, piecos rakstos konferenču tēžu krājumos.

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs

1. **Lavrinovica I.**, Supe A., Udalcovs A., Ozolins O., Popov S. and Porins J. Exploration of Optical Amplifiers Based on Erbium (Er^{3+}) and Ytterbium (Yb^{3+}) Doped Fiber Segments and Their Emerging Applications// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). **Japāna**, Tojama, 1.–4. augusts, 2018 (**Invited**).
2. Nazarovs V., Jelinskis J., Porins J. **Lavrinovica I.**, Supe A. and Aispurs V. Architecture and research of M2M wireless mesh networks// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). **Krievija**, Sanktpēterburga, 22.–25. maijs, 2017.
3. Maharjan R., **Lavrinovica I.**, Supe A., Porins J. Minimization of FWM Effect in Nonlinear Optical Fiber using Variable Channel Spacing Technique// Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). **Latvija**, Rīga, 3.–4. novembris, 2016.
4. Shakya S., Supe A., **Lavrinovica I.**, Porins J. Different Optical Fiber Nonlinear Coefficient Experimental Measurements// 6th International Work Shop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN). **Portugāle**, Lisabona, 18.–20. oktobris, 2016.
5. **Lavrinovica I.**, Porins J., Bruklitis E., Supe A. Evaluation of Effective Area and Nonlinearity Coefficient of Erbium-Ytterbium Doped Optical Fibers// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), **Kīna**, Šanhaja, 8.–10. augusts, 2016.
6. **Lavrinovica I.**, Porins J. An improvement of EDFA efficiency by using Ytterbium co-doped optical fibers// IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom 2016). **Bulgārija**, Varna, 6.–9. jūnijs, 2016.
7. **Lavrinovica I.**, Porins J. Noise Figure Analysis of EDFA with different pumping configurations in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Advances in

Wireless and Optical Communications (RTUWO). **Latvija**, Rīga, 5.–6. novembris, 2015.

8. **Lavrinovica I.**, Porins J. Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). **Čehijas Republika**, Prāga, 6.–9. jūlijs, 2015.
9. **Lavrinovica I.**, Porins J., Investigation of EDFA performance in 8 channel WDM transmission system// 11th conference Developments in Optics and Communications (DOC2015). **Latvija**, Rīga, 8.–10. aprīlis, 2015.
10. Bajpayee P., Porins J., **Lavrinovica I.**, Investigation of PMD in 40 GBit/s Coherent QPSK Transmission System, Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, Telecommunications Section. **Latvia**, Riga, 17th October, 2014.
11. **Lavrinoviča I.**, Porins J., Supe A. EDFA pastiprināšanas režīmu novērtējums 16 kanālu WDM sakaru sistēmā// 54. RTU studentu zinātniskā un tehniskā konference, Telekomunikāciju sekcija. **Latvija**, Rīga, 10. maijs, 2013.
12. Osipova K., **Lavrinoviča I.**, Parts R., ADSL adaptēšanās spēja// 53. RTU studentu zinātniskā un tehniskā konference, Telekomunikāciju sekcija. **Latvija**, Rīga, 17. aprīlis, 2012.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. **Lavrinovica I.**, Porins J., Supe A. Experimental Measurement of Erbium-doped Optical Fibers Characteristics for EDFA Performance Optimization// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2019. – No. 2. – pp. 1–10. (Apstiprināts publicēšanai).

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. **Lavrinovica I.**, Supe A., Udalcovs A., Ozolins O., Popov S. and Porins J. Exploration of Optical Amplifiers Based on Erbium (Er^{3+}) and Ytterbium (Yb^{3+}) Doped Fiber Segments and Their Emerging Applications// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). - Japan, Toyama, August 1–4. – 2018. – pp. 237–240. **(Invited)**.
2. Nazarovs V., Jelinskis J., Porins J., **Lavrinovica I.**, Supe A. and Aispurs V. Architecture and research of M2M wireless mesh networks// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Russia, Saint Petersburg, May 22–15. – 2017. – pp. 2500–2503.
3. Maharjan R., **Lavrinovica I.**, Supe A., Porins J. Minimization of FWM Effect in Nonlinear Optical Fiber using Variable Channel Spacing Technique// Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – Latvia, Riga, November 3–4. – 2016. – pp. 1–4.
4. Shakya S., Supe A., **Lavrinovica I.**, Porins J. Different Optical Fiber Nonlinear Coefficient Experimental Measurements// Proceedings of 6th International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN). – Portugal, Lisbon, October 18–19. – 2016. – pp. 1–4.

5. **Lavrinovica I.**, Porins J., Bruklitis E., Supe A. Evaluation of Effective Area and Nonlinearity Coefficient of Erbium-Ytterbium Doped Optical Fibers// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – China, Shanghai, August 8–11. – 2016. – pp. 3438–3441.
6. **Lavrinovica I.**, Porins J. An improvement of EDFA efficiency by using Ytterbium co-doped optical fibers// Proceedings of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). – Bulgaria, Varna, June 6–9. – 2016. – pp. 1–3.
7. **Lavrinovica I.**, Porins J. Noise Figure Analysis of EDFA with different pumping configurations in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – Riga, Latvia, November 5–6. – 2015. – pp. 34–37.
8. **Lavrinovica I.**, Porins J., Ivanovs G. Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Czech Republic, Prague, July 6–9. – 2015. – pp. 502–505.

Raksti konferenču tēžu krājumos

1. **Lavrinovica I.**, Porins J., Supe A. Evaluation of effective area of ytterbium doped optical fiber// Developments in Optics and Communications (DOC 2016). – Riga, Latvia, March 21–23. – 2016. – p. 49.
2. **Lavrinovica I.**, Porins J. Investigation of EDFA performance in 8 channel WDM transmission system// Developments in Optics and Communications (DOC 2015). – Riga, Latvia, April 8–10. – 2015. – p. 59.
3. **Lavrinovica I.**, Porins J., Ivanovs G. Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Book of Abstracts. – Czech Republic, Prague, July 6–9. – 2015. – p. 576.
4. **Lavrinovica I.**, Porins J., Supe A. An estimation of EDFA amplification states in 16 channels WDM communication system// Riga Technical University 54th Student Scientific Conference Telecommunications Section. – Riga, Latvia, May 10. – 2013. – p. 26.
5. Osipova K., **Lavrinovica I.**, Parts R. ADSL system adaptivity// Riga Technical University 53rd Student Scientific Conference Telecommunications Section. – Riga, Latvia, April 17. – 2012. – p. 48.

Latvijas patenta pieteikumi

Lavrinoviča I., Poriņš J., Supe A., Ivanovs Ģ. Ar retzemju elementiem leģētu telekomunikāciju optisko šķiedru efektīvā laukuma mērīšanas sistēma, P-16-103, (publikācijas datums 20.06.2018.).

Latvijas zinātniskās pētniecības projekti

1. Valsts pētījumu programmas “Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai (*SOPHIS*)” projekts nr. 4 – tehnoloģiju izstrāde gudro pilsētu attīstībai. Projekts līg. Nr. 10-4/VPP-4/11, 2014.–2017. g.
2. Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai, Eiropas Sociālā fonda CPZ projekts Nr. 2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016 2013.–2015. g.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 103 lappuses. Tajā ietilpst ievads, četras nodaļas, literatūras saraksts un pielikumi.

Ievaddaļā ir pamatota izvēlēta pētījuma virziena aktualitāte un noteikts promocijas darba pētījuma objekts.

Darba pirmajā nodaļā ir apskatīti aktuālie ātrdarbīgo šķiedru optikas pārraides sistēmu attīstības virzieni. Ir aprakstīti un pēc fizikālajām īpašībām salīdzināti izplatītākie optiskie pastiprinātāji, vadoties pēc šādiem kritērijiem: iespējas iegūt maksimālo pastiprinājuma koeficientu ar minimālo trokšņa faktora vērtību un ierosinošā avota jaudas patēriņu.

Otrajā nodaļā ar datorsimulācijām un eksperimentāli pētīta ar erbiju legētas šķiedras pastiprinātāja *EDFA* pamatparametru – pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora – atkarība no legētās šķiedras garuma un jaudas. Simulācijas mērķis ir novērtēt pastiprinājuma izmaiņas un provizoriski noteikt optimālos šķiedras garumus. Par optimālo kritēriju tiek pieņemts tas legētās šķiedras garums, ar kuru var iegūt maksimālo pastiprinājuma koeficientu. Ņemot vērā simulāciju rezultātus, ir veikti praktiskie eksperimenti pastiprinājuma efektivitātes novērtēšanai.

Darba trešajā nodaļā ir eksperimentāli nomērīts efektīvā laukuma A_{eff} parametrs ar erbiju un iterbiju legētām šķiedrām, izmantojot šķērsnobīdes metodi pie diviem viļņu garumiem: 1310 nm un 1550 nm.

Ceturtnā nodaļa ir veltīta ar iterbiju legētu optisko šķiedru (*YDF*) lietošanas izpētei *EDFA* efektivitātes uzlabošanā. Veiktajiem pētījumiem ir divi posmi. Sākumā pētītas iterbija šķiedras fizikālās īpašības, stimulētās emisijas norises process un izanalizēta *YDF* izmantošana pastiprinājuma viļņa garumu diapazona paplašināšanai. Ar datorprogrammu ir modelēts oscilatora jaudas pastiprinātājs *MOPA*, lai novērtētu kombinētā pastiprinātāja izejas jaudas gadījumā, ja tiek izmantotas gan ar erbija, gan ar iterbija joniem dubultlegēta šķiedra. Nākamajā posmā ir veikta kombinētā ar erbiju un iterbiju legētās šķiedras pastiprinātāja *EYDFA* eksperimentāla realizācija, lai novērtētu *EDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora uzlabošanas iespējas, pievienojot ar erbiju legētajai šķiedrai papildus ar Yb^{3+} joniem legētās šķiedras posmu.

Nobeiguma daļā ir apkopoti promocijas darba galvenie secinājumi, kā arī dots īss ieskats turpmākajos pētījumos.

DARBA NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Šajā nodaļā aprakstīti un pēc fizikālajām īpašībām salīdzināti izplatītāko optisko pastiprinātāju veidi, no tā izriet pētījuma priekšmeta – ar retzemju elementu joniem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju (*REDFA*) – izvēles pamatojums.

Nozīmīgākie parametri, kas nosaka optisko šķiedru pastiprinātāju darbības efektivitāti, ir pastiprinājuma koeficients, piesātinājuma jauda, pastiprinātā spontānā izstarojuma jauda un pastiprinātāja trokšņa faktors. Atkarībā no fizikālajiem procesiem, kas veicina stimulētās emisijas norisi un optiskā signāla pastiprināšanu, šķiedru optikas pārraides sistēmās izmantotos optiskos pastiprinātājus iedala šādās grupās:

- pastiprinātāji, kuru darbības pamatā ir nelineārie optiskie efekti – pastiprinātāji uz Briljuēna–Mandelštama un Ramana izkliedes efektu bāzes, kā arī uz četru viļņu mijiedarbes (*FWM*) efekta balstīti pastiprinātāji (*FOPA*);
- pastiprinātāji uz leģētu šķiedru bāzes, kur aktīvā vide ir ar retzemju elementu joniem leģēta optiskā šķiedra (*REDFA*);
- lāzera tipa pusvadītāju pastiprinātāji, kuros fotona emisiju veicina elektronu un caurumu rekombinācija pusvadītājā tiešās strāvas iedarbībā, nevis ārējā pumpēšana ar optisko starojumu (*SOA*, *LOA*).

Izanalizējot katras grupas pastiprinātāju darbības principu, par promocijas darba pētījuma objektu tika izvēlēti ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāji *REDFA* (*Rare-Earth-Doped Fiber Amplifiers*). Salīdzinot ar Ramana un pusvadītāju pastiprinātājiem, tie nav atkarīgi no polarizācijas un ir stabili pēc temperatūras, savukārt, salīdzinot ar parametriskajiem pastiprinātājiem, *REDFA* ir vienkāršāk realizēt praktiski. Respektīvi, uzlaboto *REDFA* pastiprinātāju izstrāde ir aktuāls virziens, jo, apvienojot dažādu tipu leģētas šķiedras, ir iespējams iegūt plašāku pastiprinājuma joslu, kur iespējamais ieguvums ir ap 35 nm atkarībā no konkrētā leģējošā elementa, kā arī lielāku pastiprinājuma koeficientu, nezaudējot enerģiju uz siltumnovadi.

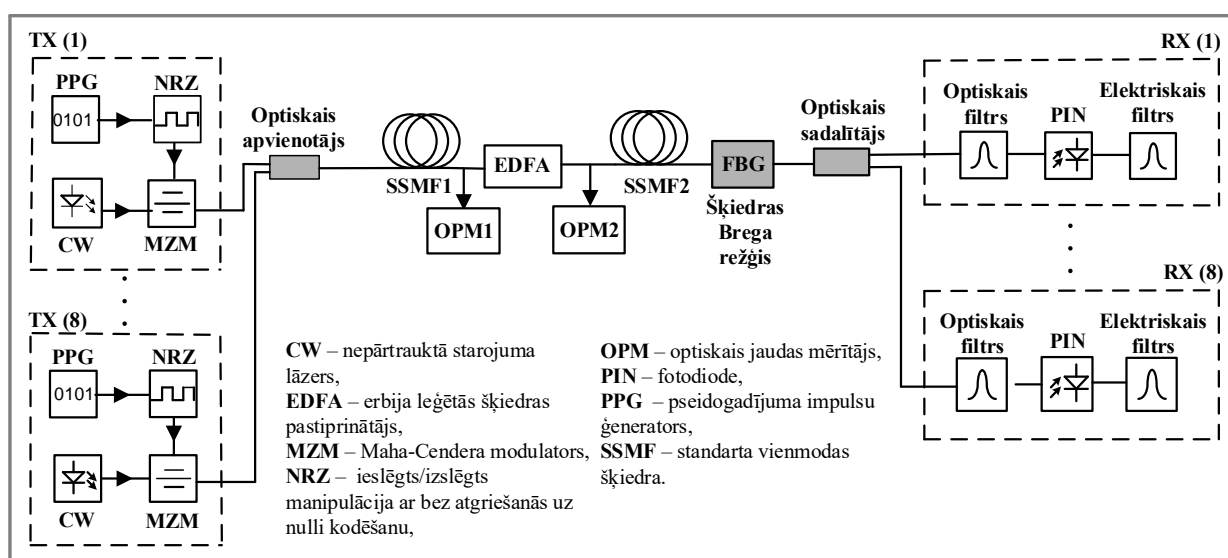
Otrā nodaļa

Darba otrajā nodaļā novērtēta divu ar erbiju leģētas šķiedras pastiprinātāja (*EDFA*) pamatparametru – pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora – atkarība no leģētās šķiedras garuma un jaudas. *EDFA* darbības izpēte ir veikta pēc optimālā kritērija attiecībā pret pastiprinājuma efektivitāti. Šādu kritēriju veido noteikta ar erbiju leģētās šķiedras garuma un ierosinošā avota jaudas kombinācija, kas nodrošinātu maksimālo pastiprinājuma koeficientu ar zemu trokšņa faktoru. Leģētās šķiedras garumam jābūt tādām, lai varētu iegūt maksimālo pastiprinājumu pie uzdotās retzemju elementa jonu koncentrācijas. Gadījumā, kad šķiedra ir pārāk gara, tālajos galos parādīsies signāla absorbcija. Savukārt, ja garums būs nepietiekams – pumpēšanas izstarojums netiks izmantots pilnā mērā. Izvēlētie leģēto šķiedru garumi ir 10 m, 15 m, 20 m, 25 m un 30 m, bet atbilstošas ierosinošā avota jaudas attiecīgi

200 mW, 300 mW, 400 mW un 500 mW. Šādas ierosinošā avota jaudas tika izvēlētas ar mērķi iegūt augstākas pastiprinājuma vērtības.

EDFA pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora izpētei datorsimulācijas programmā tika izveidota astoņu kanālu *WDM* sakaru sistēma ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s. Sakaru sistēmai ir piemērota *NRZ-OOK* (*Non-Return to Zero On/Off Keying*) modulācija un 100 GHz starpkanālu intervāls, kas ir izvēlēts saskaņā ar *ITU* rekomendāciju G.694.1 [6]. Respektīvi, pirmā kanāla frekvence pie 1554,9 nm atbilst 192,8 THz, un astotā kanāla frekvence pie 1549,3 nm atbilst 193,5 THz. *EDFA* šajā sistēmā darbojas kā līnijas pastiprinātājs, jo līnijas pastiprinātājam nav izteikta nelineāro efektu ietekme.

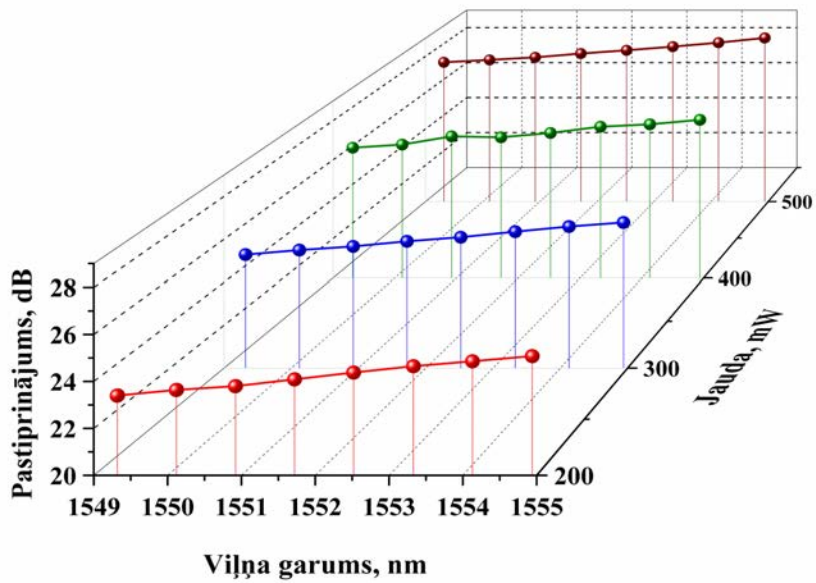
Pastiprinājuma un trokšņa faktora vērtības tika mērītas katrā sakaru sistēmas kanālā tiešajā un pretējā virzienā – pie viļņa garumiem 980 nm un 1480 nm. Modelējamās sakaru sistēmas blokshēma ir redzama 2. attēlā.



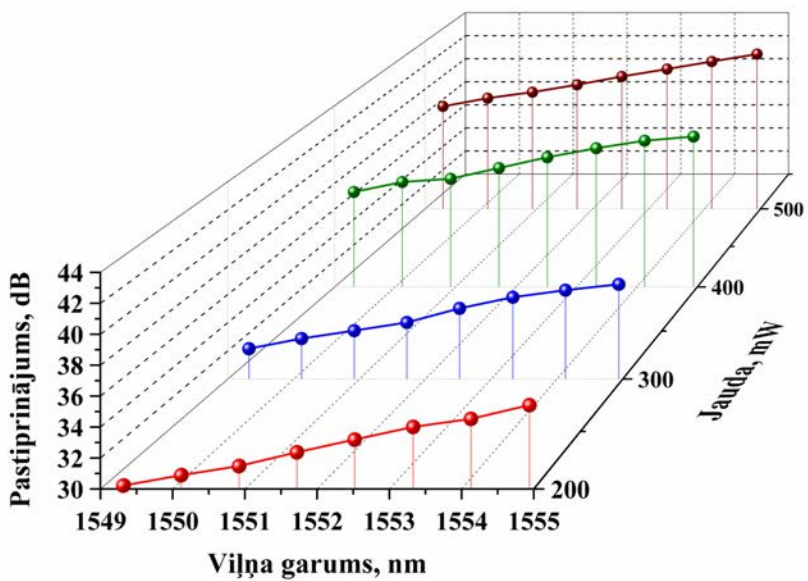
2. att. Astoņu kanālu sakaru sistēmas blokshēma.

Tiešajā virzienā pie 980 nm ar 15 m garo erbija šķiedru (3. att.) un 200 mW ierosinošā avota jaudu ir iegūts 24 dB pastiprinājums, kas ir vienmērīgi sadalīts starp visiem pārraides sistēmas kanāliem: pastiprinājuma koeficienta starpība katrā kanālā ir 0,2 dB robežās. Atbilstošā trokšņa faktora vērtība – 4,4 dB.

Pretējā virzienā pie 1480 nm (4. att.) augstākais pastiprinājuma koeficients, kas atbilst 40,7 dB, tika iegūts ar 30 m garo leģēto šķiedru. Trokšņa faktora vērtības sasniedz 9–15 dB, respektīvi, *EDFA* konfigurācija pretējā virzienā veicina trokšņa faktora pieaugumu virs 5 dB. Apkopojot iegūtos *EDFA* datormodelešanas rezultātus, ir secināts, ka pastiprinājums lineāri pieaug, kā arī ir noteikti leģēto šķiedru garumi, ar kuriem tālāk veikta *EDFA* eksperimentālā izpēte.



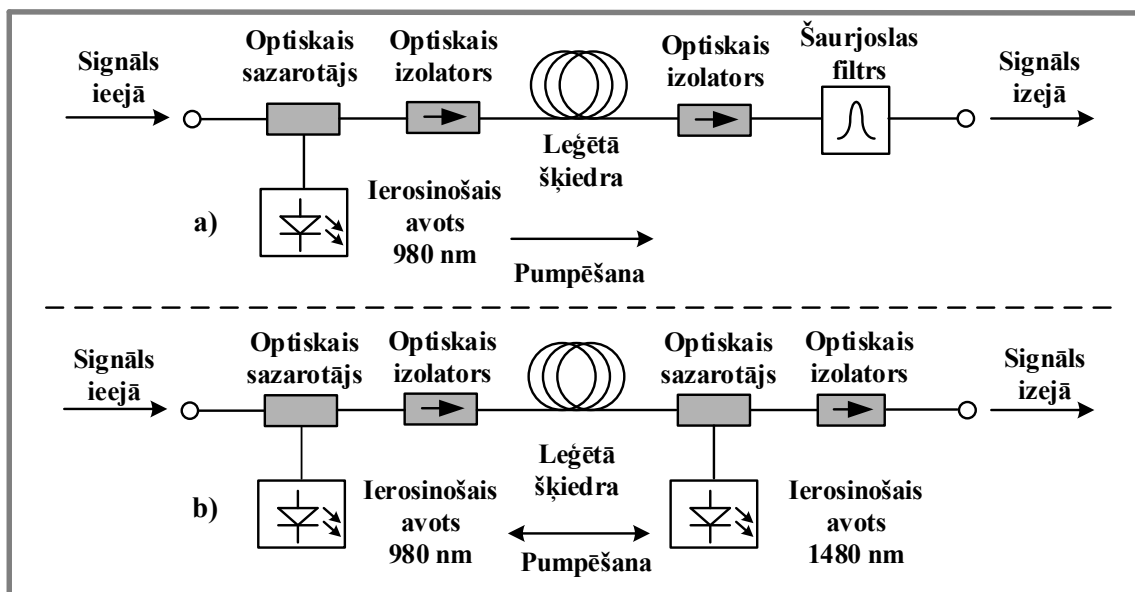
3. att. Pastiprinājuma raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām tiešajā virzienā 15 m garajai erbija šķiedrai.



4. att. Pastiprinājuma raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām pretējā virzienā 30 m garajai erbija šķiedrai.

EDFA praktiskā realizācija ir veikta, izmantojot dažāda garuma erbija šķiedru paraugus no diviem ražotājiem: *HighWave (HWT)* un *Fibercore*. Dažādu paraugu izmantošana ir nepieciešama, lai novērtētu stimulētās emisijas dinamiku atkarībā no jaudas. Izmantotajām erbija šķiedrām atšķiras tādi ģeometriskie parametri kā absorbcijas koeficients, serdeņa rādiuss un skaitliskā apertūra, kā arī ir dažāda aktīvo jonu koncentrācija. Respektīvi, ierosinošā avota jaudu diapazons katram šķiedras tipam un garumam arī atšķiras.

Konkrētie lielumi tika noteikti starpmērījumu gaitā, pētot ierosināšanas procesu pie dažādām jaudām, līdz noteikti optimālie parametri – šķiedras garuma un ierosinošā avota jaudas kombinācija, ko varētu izmantot uzlabotā optiskā pastiprinātāja izveidē. Ieejas signāla līmenis visu mērījumu gaitā atbilst 13,2 dBm, savukārt ierosinošā avota jaudu diapazons – no 21,1 mW līdz 54,1 mW. Eksperimentālā shēma ar pumpēšanu tiešajā virzienā un ar divvirzienu pumpēšanu ir redzama 5. attēlā.

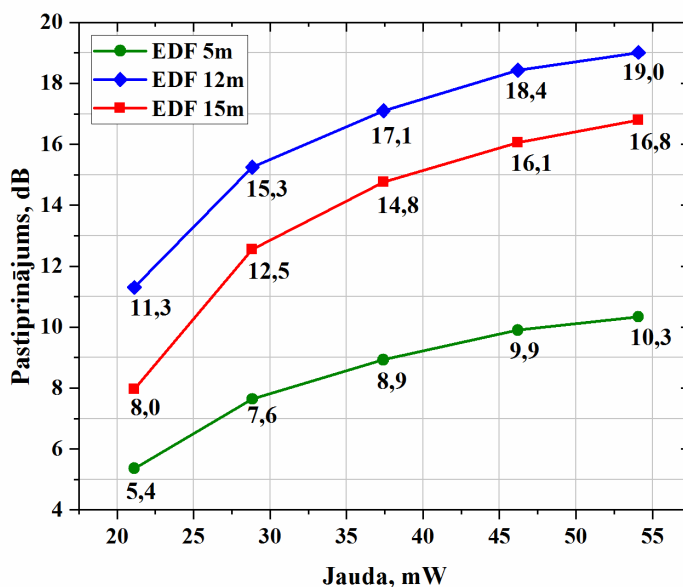


5. att. EDFA eksperimentālā blokshēma ar pumpēšanu tiešajā virzienā (a) un ar divvirzienu pumpēšanu (b).

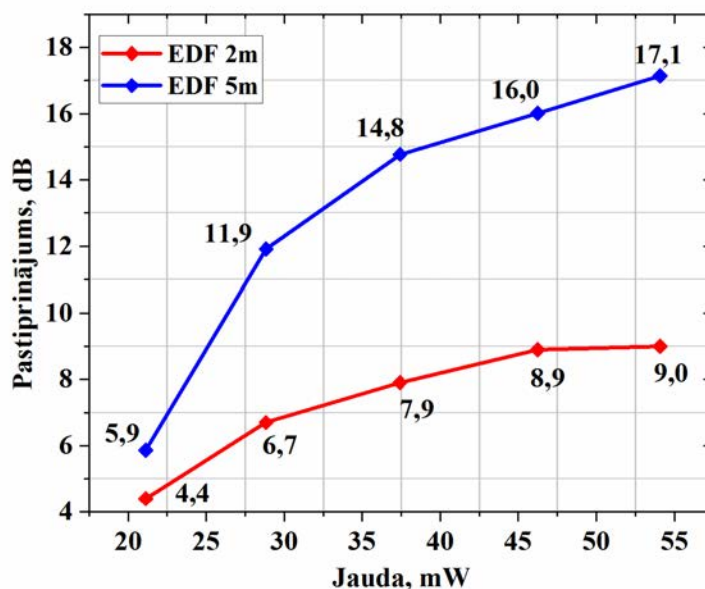
Nozīmīgākie rezultāti šajā eksperimentā tika iegūti ar 15 m garu *HWT* un 2 m garu *Fibercore* šķiedru. Kā redzams 6. attēlā, ar 5 m garu *HWT* tiek ātrāk sasniegts EDFA piesātinājuma režīms: jaudai pieaugot par 8 mW (no 46,2 mW līdz 54,1 mW), pastiprinājuma koeficients izmainās par 0,8 dB. Piemērojot divvirzienu pumpēšanu šādam šķiedras garumam, minimālai ierosinošā avota jaudai 21,3 mW atbilst 14,4 dB pastiprinājuma koeficients. Tas nodrošina 16 mW jaudas ietaupījumu, salīdzinot ar vienvirziena pumpēšanu, kur šādu pastiprinājuma koeficientu iegūst ar jaudu 37,4 mW.

Maksimāli iegūtais pastiprinājums ar 2 m *Fibercore* šķiedru, piemērojot divvirzienu pumpēšanu (7. att.), ir 9 dB pie ierosinošā avota jaudas 54,1 mW. Pagarinot šķiedru līdz 5 m, maksimālā pastiprinājuma pieaugums ir 7,2 dB (pastiprinājuma koeficients attiecīgi ir 17,1 dB).

Iegūtie rezultāti skaidri parāda, ka ar divvirzienu *EDFA* konfigurāciju un *Fibercore* erbija šķiedru ir iespējams samazināt leģētās šķiedras garumu, kas ir nozīmīgi optiskā pastiprinātāja konstrukcijā. Eksperimentālo mērījumu gaitā ir noteikti provizoriskie erbija šķiedru garumi (5–20 m), kas nodrošina pastiprinājuma koeficientu 16–20 dB robežās pie ierosinošā avota jaudas līdz 54 mW.



6. att. Pastiprinājuma atkarība no ierosinošā avota jaudas 5 m, 12 m un 15 m garajām *HighWave* erbija šķiedrām tiešajā virzienā.



7. att. Pastiprinājuma atkarība no ierosinošā avota jaudas 2 m un 5 m garajām *Fibercore* erbija šķiedrām, izmantojot divvirzienu pumpēšanu.

Trešā nodaļa

Efektīvā laukuma parametrs A_{eff} ir ieviests ar mērķi novērtēt nelineāros efektus no iegūtā reālā optiskās intensitātes sadalījuma šķiedrā. Šķiedras efektīvais laukums ir atkarīgs no šķiedras ģeometriskiem parametriem, tādiem kā serdeņa rādiuss, kā arī no kodola un apvalka laušanas koeficientu starpības. Efektīvā laukuma parametram ir noteicošā loma nelineāro efektu ietekmes analizē, tāpēc, izstrādājot optiskos pastiprinātājus, ir būtiski precīzi noteikt šo lielumu. Optiskā signāla kropļojumus nelineāro efektu ietekmē apraksta izteiksme:

$$kP_0L_{\text{eff}} = \frac{kP_0}{g} [\exp(gL) - 1] = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \frac{P_0}{g} [\exp(gL) - 1], \quad (2.)$$

kur

k – nelineārais koeficients;

L_{eff} – šķiedras efektīvais garums;

n_2 – laušanas koeficients;

A_{eff} – šķiedras efektīvais laukums;

P_0 – vidējā ieejas jauda katrā pārraides sistēmas kanālā;

g – vidējais pastiprinājuma koeficients;

L – leģētās šķiedras garums.

Respektīvi, analizējot 2. izteiksmi, ir redzams, ka nelineāro efektu samazināšanas nolūkos ir jāpalielina efektīvais laukums A_{eff} un pastiprinājuma koeficients g [3].

Promocijas darbā efektīvā laukuma mērījumi ar erbiju un iterbiju leģētām šķiedrām tika veikti, izmantojot šķērsnobīdes metodi. Tās pamatā ir šāda tehnika: optiskā jauda tiek pārraidīta no vienas šķiedras otrā, šo šķiedru asis ir paralēlas, bet sāniski nobīdītas viena no otras. Atšķirībā no avotā [5] aprakstītās interferometriskās šķērsnobīdes metodes interferometrs netiek izmantots, un tālā lauka sadalījuma noteikšana ir realizēta, izmantojot pārskatājamu lāzera gaismas avotu, mikropozicionieri, optiskās jaudas mērītāju un spektra analizatoru.

Mikropozicioniera mazākā soļa izmērs ir 0,16 μm , bet vienlaikus ir iespējams veikt pārbīdes pa visu šķiedras diametru (tipiski 125 μm). Tas nodrošina precīzu šķiedru nobīdi trīs dažādos virzienos (koordinātu asis x , y , z). Šķiedra pakāpeniski tiek bīdīta pa vienu no šķērsnobīdes asīm, un vienlaikus tiek fiksēta optiskā jauda mērāmās šķiedras izejā. Jaudas sadalījuma mērījumi tālajā laukā ir veikti pie viļņa garumiem: 1310 nm un 1550 nm ar diviem jaudas līmeņiem P_1 un P_2 . Divu jaudas līmeņu izmantošana dod iespēju iegūt plašāku informāciju par optiskā starojuma sadalījuma raksturu pētāmajā šķiedrā.

Eksperimentāli iegūtais tālā lauka jaudas sadalījums ar erbiju (8. att.) un iterbiju (9. att.) leģētajām šķiedrām tika pārrēķināts uz tuvā lauka sadalījumu, apstrādājot mērījumu rezultātus ar programmā *MATLAB* realizēto aprēķinu algoritmu. Aprēķinātās A_{eff} vērtības ir apkopotas 1. tabulā.

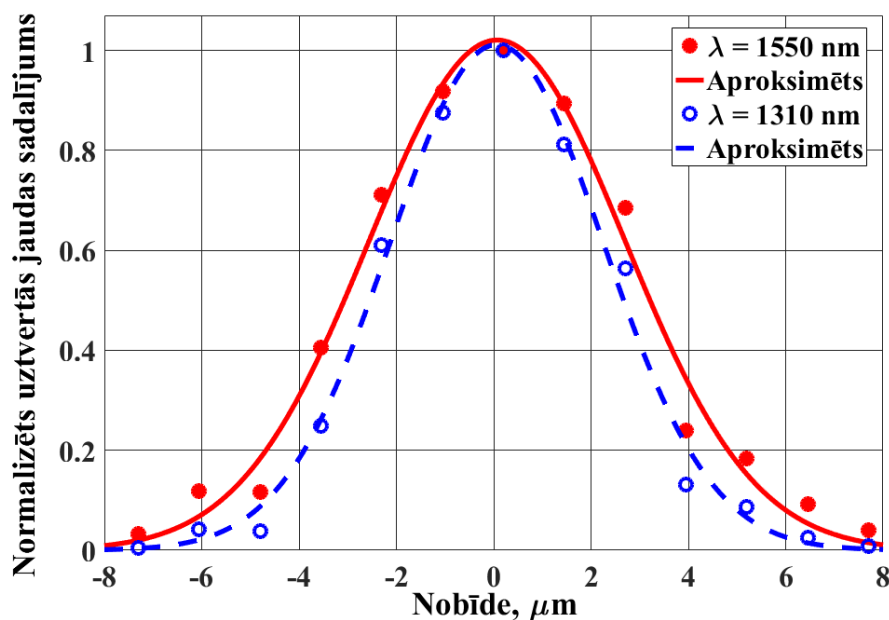
EDF šķiedrai maksimālā iegūtā efektīvā laukuma vērtība pie 1310 nm atbilst 36,5 μm^2 , savukārt pie 1550 nm tā pieaug līdz 57,1 μm^2 . Iterbija šķiedras gadījumā A_{eff} parametrs ir lielāks nekā erbija šķiedrai. Pie 1310 nm tas ir 106,2 μm^2 , bet pie 1550 nm – 129,4 μm^2 . Kā

redzams 2.1. tabulā, veicot mērījumus pie dažādām gaismas avota izejas jaudām, tiek iegūtas atšķirīgas šķiedras efektīvā laukuma vērtības. Erbija šķiedrai šī starpība ir līdz $1 \mu\text{m}^2$, iterbija šķiedrai – $3 \mu\text{m}^2$ robežās.

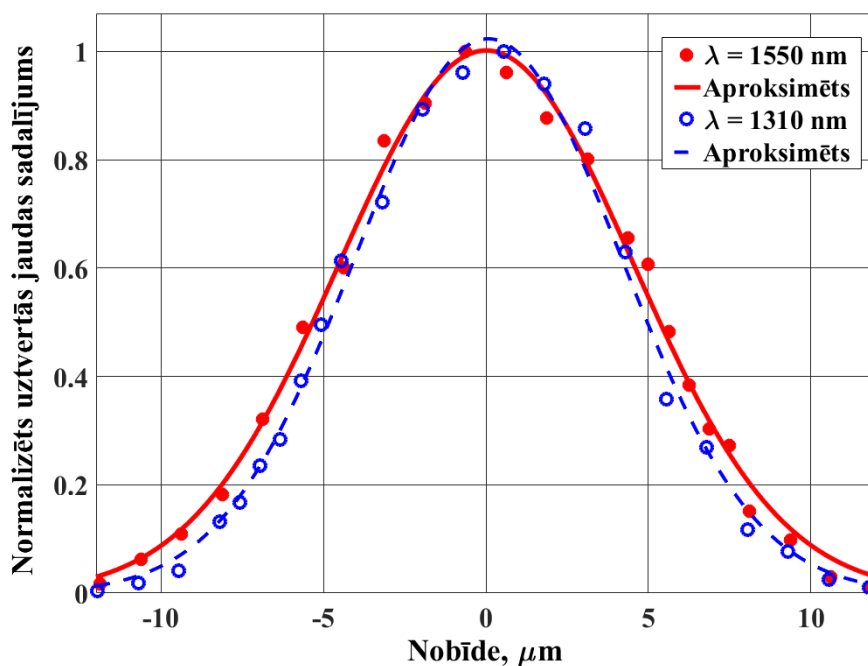
1. tabula

Ar erbija un iterbija leģētas šķiedras efektīvā laukuma mērījumu rezultāti atkarībā no viļņa garuma

Ar erbiju leģētā šķiedra <i>HighWave HWT-FIB-EDF-EXC-BAND-002</i>				
Pozīcija	Jauda, dBm	Viļņa garums 1310 nm	Jauda, dBm	Viļņa garums 1550 nm
		$A_{\text{eff}}, \mu\text{m}^2$		$A_{\text{eff}}, \mu\text{m}^2$
P_1 (y ass)	-30,2	30,2	-27,7	42,7
P_1 (z ass)	-30,5	36,5	-27,1	57,1
P_2 (y ass)	-27,4	30,3	-26,9	43,5
P_2 (z ass)	-26,9	35,8	-26,5	56,9
Ar iterbija leģēta šķiedra <i>LIEKKI Yb 1420-1560, 15 %</i>				
Pozīcija	Jauda, dBm	Viļņa garums 1310 nm	Jauda, dBm	Viļņa garums 1550 nm
		$A_{\text{eff}}, \mu\text{m}^2$		$A_{\text{eff}}, \mu\text{m}^2$
P_1 (y ass)	-30,9	106,2	-23,6	129,6
P_1 (z ass)	-33,6	76,6	-23,0	96,5
P_2 (y ass)	-30,7	105,3	-20,6	129,2
P_2 (z ass)	-30,3	74,1	-20,1	94,0



8. att. Optiskā starojuma tuvā lauka sadalījums pa šķiedras šķērsgriezumu pie viļņu garumiem 1310 nm un 1510 nm ar erbiju leģētai šķiedrai.



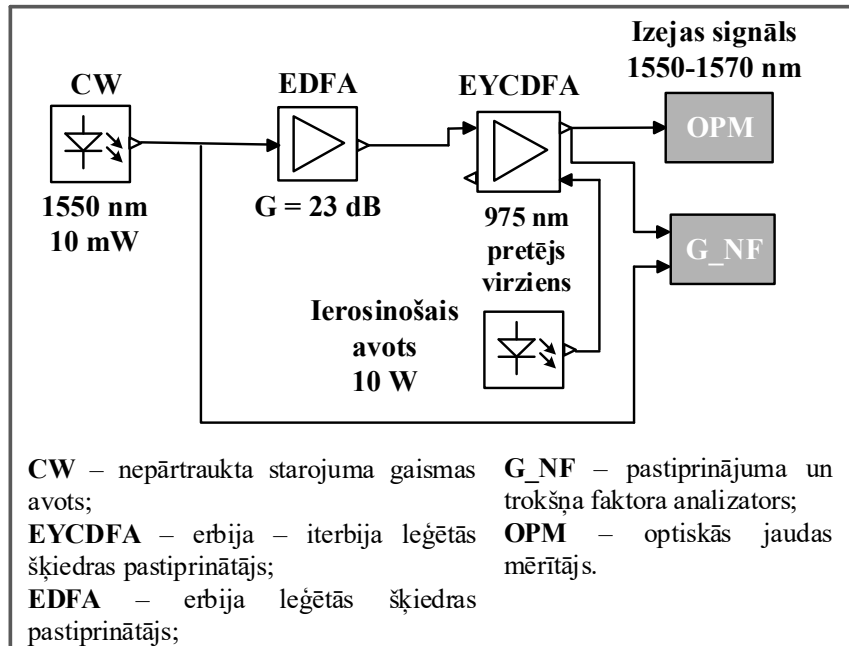
9. att. Optiskā starojuma tuvā lauka sadalījums pa šķiedras šķērsgrizumu pie viļņu garumiem 1310 nm un 1510 nm ar iterbiju leģētai šķiedrai.

Iegūtie rezultāti parāda, ka kombinēto optisko pastiprinātāju izstrādē ir lietderīgi izmantot ar iterbiju leģētas šķiedras, kurām raksturīgs lielāks efektīvais laukums, bet ir jāņem vērā pastiprinātāja izmantošanas specifika. Ja ir mērķis uzlabot pastiprinājuma un ierosinošā avota jaudas raksturlielni, modas lauks ir jāsamazina. Šajā gadījumā priekšroka tiek dota šķiedrām ar mazākajiem A_{eff} rādītājiem, jo tādējādi ir iespējams kombinēt dažādus ierosinošā avota un ieejas signāla viļņu garumus. Savukārt, ja prioritāte ir iegūt lielākās izejas jaudas, efektīvāk izmantot šķiedras ar augstāko A_{eff} .

Ceturrtā nodaļa

Apvienojot ar erbiju (*EDF*) un iterbiju (*YDF*) leģētas šķiedras, ir iespējams samazināt nelineāro efektu izpausmi. Šāds kombinētais risinājums dod iespēju nodrošināt lielākas optisko pastiprinātāju izejas jaudas, jo, pateicoties lielākajam šķērsgrizuma laukumam, iterbija joni absorbē maksimumu no ierosinošā avota jaudas [15].

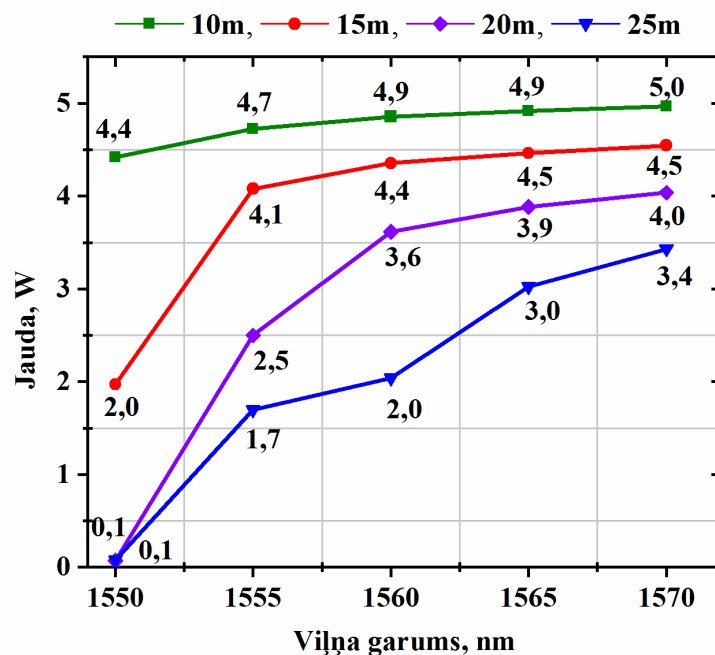
Lai novērtētu pastiprinātāja izejas jaudas gadījumā, ja tiek izmantota ar erbija (Er^{3+}) un iterbija (Yb^{3+}) joniem leģēta šķiedra, datorsimulācijas programmā tika modelēts kombinētais ar erbija un iterbija joniem leģētas šķiedras pastiprinātājs (*EYCDFA*). Tas ir realizēts, izmantojot divu optisko pastiprinātāju – *EDFA* un *EYCDFA* – kaskādes slēgumu, kas tiek saukts par *MOPA* (*Master Oscillator Power Amplifier*) jeb oscilatora jaudas pastiprinātāju. *MOPA* ir efektīvākais risinājums jaudīgo impulsu ģenerēšanai, turklāt tas ir viegli pārskatāms, līdz ar ko nodrošina plašas vadības un pilnveidošanas iespējas (10. att). Modelī ir izmantota iterbija šķiedra ar dubultu apvalku. Serdeņa diametrs ir 30 μm , iekšējā apvalka diametrs – 650 μm , serdeņa profils veidots pēc LP_{01} modas. Iterbija šķiedrām garums tika manīts no 10 m līdz 25 m ar soli 5 m. Izejas signāla jauda ir mērīta ar optisko jaudas mērītāju viļņu garumu diapazonā 1550–1570 nm.



10. att. Kombinētā jaudas pastiprinātāja blokshēma.

Iegūtie rezultāti parāda, ka stabilāka izejas jaudas raksturlīkne viļņa garumu diapazonā 1550–1570 nm atbilst 10 m garai *YDF* šķiedrai, kur kombinētā pastiprinātāja izejas jaudas ir 36 dBm (4–5 W) robežās (11. att.). Pagarinot iterbija šķiedru līdz 15 m, diapazonā no 1555 nm līdz 1565 nm jauda pieaug, savukārt, sākot ar 1570 nm *EYCDFA* pāriet piesātinājuma režīmā.

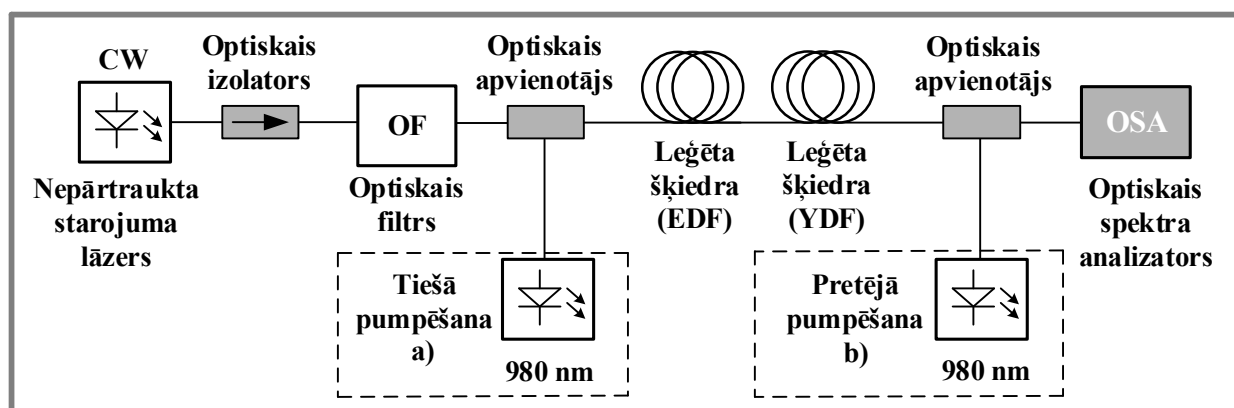
Izmantojot 25 m garo iterbija šķiedru, maksimālā *EYCDFA* izejas jaudas vērtība atbilst 35 dBm (3,4 W). Respektīvi, palielinot leģētās šķiedras garumu divas reizes, jauda samazinās par 1 dBm.



11. att. *EYCDFA* jaudas izmaiņas pie dažādiem iterbija šķiedru garumiem.

Nākamajā kombinēto risinājumu izpētes etapā tika pētītas *EDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora uzlabošanas iespējas, pievienojot ar erbiju leģētājai šķiedrai papildus Yb^{3+} leģētās šķiedras posmu. Šie pētījumi ir veikti doktorantūras prakses laikā Zviedrijas Karaliskajā Tehniskajā universitātes Materiālzinību un nanofizikas katedras zinātniskajā laboratorijā.

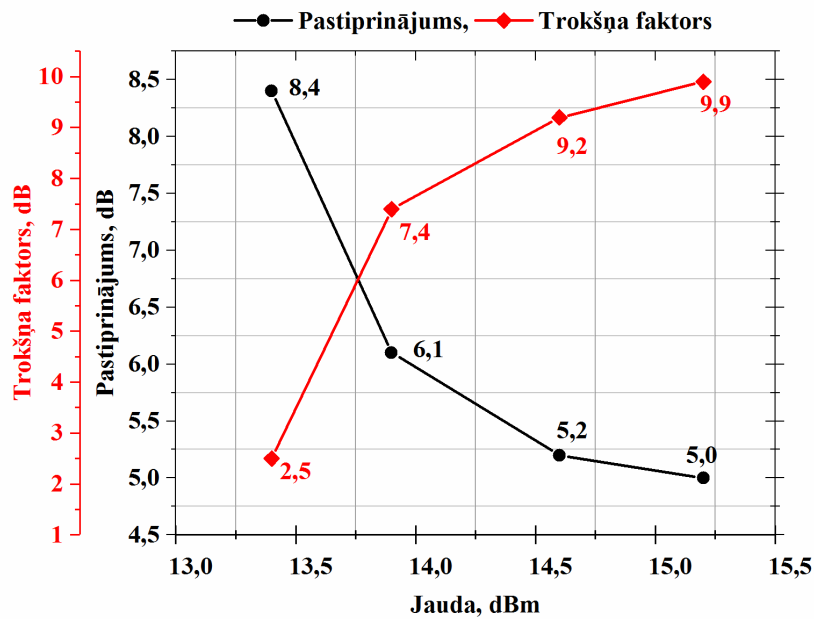
Izstrādāts kombinētais ar erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EYDFA*), kurā ietilpst 5 m garš *EDF* posms un 5 m garš *YDF* posms, kā arī novērtētas šī risinājuma izmantošanas iespējas optiskā signāla pastiprināšanai vairākas spektrālajās joslās. Izveidotā kombinētā pastiprinātāja eksperimentālā shēma ir parādīta 12. attēlā.



12. att. Kombinētā ar erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja eksperimentālā shēma ar pumpēšanu tiešajā virzienā (a) un pretējā virzienā (b) pie 980 nm.

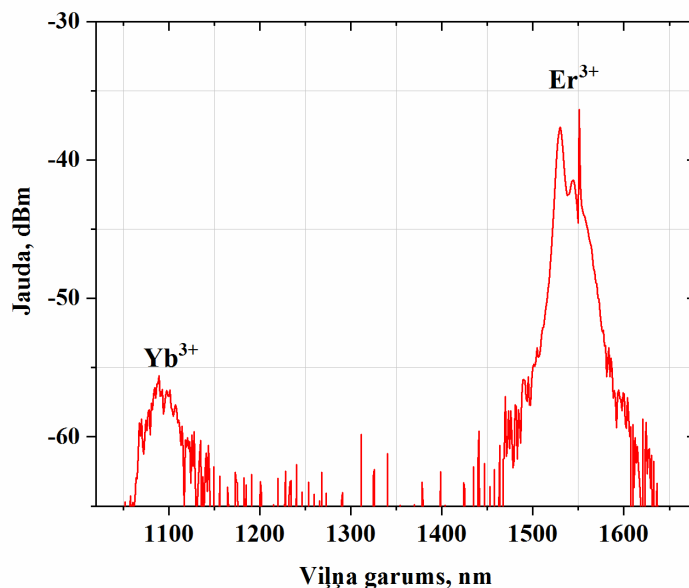
Zemas jaudas ($-30,6$ dBm) nepārtraukta starojuma lāzers (CW) ar atgriezenisko saiti darbojas kā pamatstarojums. Tas nodrošina enerģijas plūsmu uz ierosinošo avotu, tāpēc pamatstarojuma jaudai jābūt mazākai. *EYDFA* darbība tiek pētīta abos pumpēšanas virzienos, līdz ar ko arī 980 nm ierosinošais avots sākumā tika nokonfigurēts darbībai tiešajā virzienā (a) un pēc tam pretējā virzienā (b). Erbija šķiedrai *EDF HWT-FIB-EDF-EXC-BAND-002* raksturīgs 5,45 dB/m absorbcijas koeficients, 4,1 μm serdeņa rādiuss un skaitliskās apertūras rādītājs 0,22. Iterbija šķiedras *YDF LIEKKI Yb1200-4/125* serdeņa rādiusa un skaitliskās apertūras parametri ir analogiski *EDF*, savukārt absorbcijas koeficients atbilst 280 dB/m. Yb^{3+} jonu koncentrācija ir 15%. *EYDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora vērtības ir nomērītas pie ierosinošā avota jaudas no 13,4 dBm līdz 17,0 dBm.

Maksimāli iespējamais pastiprinājuma koeficients, ko var iegūt ar kombinētā ar erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāju tiešajā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, ir 6–7 dB. Izmantojot *EYCDFA* konfigurāciju ar pumpēšanu pretējā virzienā pie 980 nm, maksimālā pastiprinājuma vērtība atbilst 8,4 dB pie ierosinošā avota jaudas 13,3 dBm, savukārt pie jaudas 15,2 dBm pastiprinājuma koeficients ir 5 dB (13. att). Šāds rezultāts dod iespēju secināt, ka, piemērojot *EYDFA* pumpēšanu pretējā virzienā, ir iespējams iegūt lielāku pastiprinājumu pie zemākām ierosinošā avota jaudām.



13. att. *EYDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora raksturlīknes, izmantojot pumpēšanu pretējā virzienā pie 980 nm.

Kombinētā pastiprinātāja ASE spektrs parādīts 14. attēlā. Var redzēt, ka iterbija jonu stimulētais starojums darbojas kā papildu ierosinošais avots, kas rezultējas jaudas pieaugumā un attiecīgi optiskā signāla pastiprinājumā viļņa garumu diapazonā 1000–1100 nm. Respektīvi, izmantojot kombinēto risinājumu ar virknē saslēgtajiem *EDF* un *YDF* posmiem, ir iespējams paplašināt erbija pastiprinājuma joslu no standarta 47 nm līdz 82 nm, tādējādi pārklājot viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas C (1530–1565 nm) and L (1565–1625 nm) frekvenču joslas.



14. att. Kombinētā pastiprinātāja ASE spektrs.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Veicot *EDFA* pastiprinātāja datormodelēšanu tiešajā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, tika konstatēts, ka pie ierosinošā avota jaudas 200 mW 15 m garajai erbija šķiedrai pastiprinājuma koeficienta vērtība ir 24 dB un tā ir praktiski vienāda visos pārraides sistēmas kanālos – atšķirība ir tikai 0,2 dB. Jaudai pieaugot līdz 400 mW un 500 mW, pastiprinājuma vērtības sasniedz 27–28 dB. Svarīgi pieminēt, ka, izmantojot 15 m garo šķiedru, iegūtais pastiprinājums ir vienmērīgi sadalīts starp visiem sakaru sistēmas kanāliem. Trokšņa faktora vērtība šādai *EDFA* konfigurācijai ir 4,3 dB robežās.
2. *EDFA* pastiprinātāja darbības modelēšana pretējā pumpēšanas virzienā pie 1480 nm nodrošina maksimālo pastiprinājuma koeficientu 40,7 dB, izmantojot 30 m garu erbija šķiedru. Respektīvi, no pastiprinājuma efektivitātes viedokļa šāds šķiedras garums ir optimāls, jo nodrošina par 12 dB lielāku pastiprinājuma koeficientu, taču trokšņa faktora rādītājs sasniedz 9–15 dB.
3. Eksperimentāli noteikts, ka vāju signālu pastiprināšanas režīmā ar 15 m garu *HWT* erbija šķiedras paraugu un divvirzienu *EDFA* pumpēšanu iespējams iegūt 14,4 dB pastiprinājumu ar minimālo ierosinošā avota jaudu 21,3 mW. Tādējādi tiek nodrošināts jaudas ietaupījums līdz 16 mW, salīdzinot ar vienvirziena pumpēšanu, kur analogiskā pastiprinājuma koeficienta sasniegšanai ir jāpatērē 37,3 mW.
4. Ar šķērsnobīdes metodi nomērītas efektīvā laukuma vērtības ar erbiju leģētai šķiedrai pie 1310 nm atbilst $36,5 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm – pieaug līdz $57,1 \mu\text{m}^2$. Ierbija šķiedras gadījumā A_{eff} parametrs ir lielāks: pie 1310 nm $A_{\text{eff}} = 106,2 \mu\text{m}^2$, pie 1550 nm – $129,6 \mu\text{m}^2$. Svarīgi atzīmēt, ka, veicot A_{eff} mērījumus pie dažādiem gaismas avota izejas jaudām, tiek iegūtas atšķirīgas šķiedras efektīvā laukuma vērtības. Erbija šķiedras gadījumā starpība starp A_{eff} rādītājiem, kas nomērītas pie jaudas līmeņiem P_1 un P_2 , ir līdz $1 \mu\text{m}^2$, savukārt iterbija šķiedrai – $3 \mu\text{m}^2$ robežās. Respektīvi, efektīvā laukuma mērījumi pie dažādam jaudām sniedz plašāku informāciju par optiskā starojuma sadalījuma raksturu pētāmajā šķiedrā.
5. Kombinētā ar erbija un iterbija joniem leģētās šķiedras jaudas pastiprinātāja (*EYCDFA*) izpētes gaitā noteikts, ka, lietojot 10 m garu iterbija šķiedru, 1550–1570 nm diapazonā tiek iegūta stabila 36 dBm (5 W) izejas jauda. Izmantojot 25 m garu iterbija šķiedru, maksimālā *EYCDFA* jaudas vērtība atbilst 35 dBm (3,4 W). Tādējādi, pagarinot iterbija šķiedras garumu divas reizes, jauda samazinās par 1 dBm.
6. Izmantojot kombinētā ar erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (*EYDFA*) konfigurāciju ar pumpēšanu pretējā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, maksimāli iegūtais pastiprinājuma koeficients pie ierosinošā avota jaudas 13,3 dBm ir 8,4 dB. Palielinot ierosinošā avota jaudu līdz 15,2 dBm, maksimālais pastiprinājuma koeficients sasniedz tikai 5 dB. Respektīvi, ar pretējo *EYDFA* pumpēšanu tiek nodrošināts jaudas ietaupījums par 2 dBm.

7. Analizējot eksperimentāli iegūto kombinētā *EYDFA* pastiprinātāja spektru, ir noteikts, ka iterbija jonu stimulētais starojums darbojas kā papildu ierosinošais avots. Šāds process veicina jaudas pieaugumu un attiecīgi optiskā signāla pastiprināšanu viļņa garumu diapazonā 1000–1100 nm. Paplašinātā spektrālā josla var tikt praktiski izmantota kā ierosinošā avota pumpēšanas viļņa garums turpmākajai kombinētā pastiprinātāja izpētei.

Promocijas darba pētījumu rezultāti izmantoti divu Latvijas zinātniskās pētniecības projektu realizācijai: valsts pētījumu programmas “Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai (*SOPHIS*)” projekts nr. 4 – tehnoloģiju izstrāde gudro pilsētu attīstībai. Projekta līg. Nr. 10-4/VPP-4/11, 2014.–2017. g.; Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai, Eiropas Sociālā fonda CPZ projekts Nr. 2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016 2013.–2015. g.

Pamatojoties uz promocijas darbā iegūtajiem rezultātiem, ir sagatavots un publicēts Latvijas patenta pieteikums Nr. P-16-103 “Ar retzemju elementiem leģētu telekomunikāciju optisko šķiedru efektīvā laukuma mērīšanas sistēma”. Piedāvātā mērīšanas sistēma dod iespēju iegūt praktiski izmantojamās leģēto optisko šķiedru efektīvā laukuma vērtības.

Nobeigumā jāuzsver, ka optisko pastiprinātāju izpēte ir perspektīvs un efektīvs virziens mūsdienu šķiedru optikas pārraides sistēmās. Iegūtie promocijas darba rezultāti var tikt tālāk izmantoti kombinēto risinājumu izstrādē, jo, vadoties pēc šobrīd aktuālajām tendencēm ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru ražošanas industrijā, tiek pēfītas arī tūlija (Tm^{3+}) un bismuta (Bi^{3+}) šķiedras. Respektīvi, autores turpmākā pētniecības darbība ir vērsta uz šo šķiedru izmantošanas iespēju izpēti optiskā signāla pastiprināšanā.

LITERATŪRA

- [1] Agrawal, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*, – USA: John Wiley and Sons, 1997. – 576 p.
- [2] Agrell, E. et al. Roadmap of optical communications// *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18, No. 063002. – pp. 40.
- [3] Aiso, K., Tashiro, Y., Suzuki, T., Yagi, T. Development of Er/Yb Co-doped Fiber for High-Power Optical Amplifiers// *Furuwa Review*. – 2001. – No. 20. – pp. 41–45.
- [4] Bayvel, P., Maher, R., Xu, T., Liga, G., Shevchenko, N. A., Lavery, D., Alvarado, A., Killey, R. I. Maximizing the optical network capacity// *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2016. – Vol. 374, No. 2062. – pp. 20140440.
- [5] Billington, R. *Effective Area of Optical Fibres – Definition and Measurement Techniques*// Centre for Optical and Environmental Metrology, National Physical Laboratory.
- [6] ITU-T G. 694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid// International Telecommunication Union. – 2012. – pp. 1–16.
- [7] Foschini, G. J. and Gans, M. J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas// *Wireless Personal Communications*. – 1998. – Vol. 6, No. 3. – pp. 311–335.
- [8] Galdino, L., Edwards, A., Ionescu, M., James, J., Pelouch, W., Sillekens, E., Semrau, D., Lavery, D., Killey, R.I., Barnes, S., Bayvel, P. and Desbruslais. S. 120 Tbit/s Transmission over Single Mode Fibre using Continuous 91 nm Hybrid Raman-EDFA Amplification. arXiv:1804.01845 [physics.app-ph]. – 2018. – pp. 1–3.
- [9] *Materials for the course EE7950: Statistical Communication Theory: Shannon's Channel Capacity*// University of Alberta, Faculty of Electrical and Computer Engineering. – Canada: Edmonton.
- [10] Miyamoto, Y. and Takenouchi, H. Metro Dense Space-division-multiplexing Optical Communications Technology for Petabit-per-second Class Transmission// *NTT Technical Review Regular Articles*. – 2014. – pp. 1–7.
- [11] Morioka, T. New Generation Optical Infrastructure Technologies: EXAT Initiative Towards 2020 and Beyond// *IEEE*. – 2009. – pp. 1–2.
- [12] Ono, H. Optical Amplification Technologies for Space Division Multiplexing// *NTT Technical Review*. – 2017. – Vol. 15, No. 6. – pp. 1–6.
- [13] Saitoh, K. Multicore Fiber Technology// *Journal of Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34, No. 1. – pp. 55–65.
- [14] Semrau, D., Xu, T., Shevchenko, N., Paskov, M., Alvarado, A., Killey, R. and Bayvel, P. Achievable information rates estimates in optically amplified transmission systems using nonlinearity compensation and probabilistic shaping// *Optics Letters*, – 2017. – Vol. 42, No. 1. – pp. 121–124.
- [15] Shirakawa, A., Suzuki, H., Tanisho, M. and Ueda, K. Yb-ASE-Free Er Amplification in Short-Wavelength Filtered Er:Yb Photonic-Crystal Fiber// *Proceedings of Optical Fiber*

Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). – San Diego, USA, February 24–28. – 2008.

- [16] Tse, D. and Viswanath, P. *Fundamentals of Wireless Communication* – Cambridge: U. K., Cambridge University Press, 2006. – 585 p.
- [17] Zhu, B., Peckham, D., McCurdy, A. H., Lingle, R., Palsdottir, B., Yan, M. F., Wisk, P. W. and DiGiovanni, D. J. Large-Area Low-Loss Fibers and Advanced Amplifiers for High-Capacity Long-Haul Optical Networks [Invited]// *OSA Journal of Optical Communications and Networking*. – 2016. – Vol. 8, No. 7. – pp. A55–A63.
- [18] Никоноров Н. В., Шандаров С. М. *Волноводная фотоника. Учебное пособие. Курс лекций* – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008, 143 с.